

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.023

引用格式:耿小丽,刘兴明,杨浩,等.紫花苜蓿萌发期耐盐种质筛选及综合评价[J].草地学报,2026,34(9):3395—3402

GENG Xiao-li, LIU Xing-ming, YANG Hao, et al. Screening and Comprehensive Evaluation of Salt-Tolerant Alfalfa Germplasm at Germination Stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3395—3402

紫花苜蓿萌发期耐盐种质筛选及综合评价

耿小丽,刘兴明*,杨浩,李晓鹏,周惠丽,王彦
(甘肃草原技术推广总站,甘肃兰州730010)

摘要:为筛选耐盐性强的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种质,以43份苜蓿杂交F₂代材料,设置0%,0.3%,0.6%,1.2%四个NaCl浓度处理,测定发芽势、发芽率、鲜重、芽长和根长等农艺指标,并结合脯氨酸、丙二醛生理指标,运用主成分分析、隶属函数法和聚类分析等方法综合评价其萌发期耐盐性。结果表明:0.6% NaCl可作为紫花苜蓿萌发期耐盐性筛选的适宜胁迫浓度;发芽率、根长、芽长以及脯氨酸相对含量(R-Pro)是评价耐盐性的核心指标。筛选出GW141, GD131, GZ21, GW71, GD111, GD171和GD301共7份极端耐盐种质,这些种质在盐胁迫下同时具备“高发芽率-强根系发育”的农艺优势与“强渗透调节-弱膜脂过氧化”的生理特征,可作为耐盐育种与盐碱地改良的候选材料。

关键词:紫花苜蓿;盐胁迫;萌发期;耐盐性;生理指标;综合评价;种质筛选

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3395-08

Screening and Comprehensive Evaluation of Salt-Tolerant Alfalfa Germplasm at Germination Stage

GENG Xiao-li, LIU Xing-ming*, YANG Hao, LI Xiao-peng, ZHOU Hui-li, WANG Yan
(Gansu Grassland Technology Extension Station, Lanzhou, Gansu Province 730010, China)

Abstract: To screen salt-tolerant *Medicago sativa* L. germplasm, 43 alfalfa hybrid F₂ materials were treated with four NaCl concentrations (0%, 0.3%, 0.6%, and 1.2%). Agronomic traits, including germination potential, germination rate, fresh weight, shoot length, and root length, were measured, and key physiological indicators such as proline and malondialdehyde were analysed. Principal component analysis, membership function method, and cluster analysis were used to comprehensively evaluate salt tolerance at the germination stage. The results indicated that 0.6% NaCl was suitable for screening salt tolerance at this stage. Germination rate, root length, shoot length, and relative proline content (R-Pro) were identified as core indicators for evaluation. Seven highly salt-tolerant materials—GW141, GD131, GZ21, GW71, GD111, GD171, and GD301—were selected, which exhibited both agronomic advantages (“high germination rate and strong root development”) and physiological resistance (“strong osmotic adjustment and weak membrane lipid peroxidation”) under salt stress, providing valuable candidates for salt-tolerant breeding and saline-alkali soil improvement.

Key words: Alfalfa; Salt stress; Germination stage; Salt tolerance; Physiological indicators; Comprehensive evaluation; Germplasm screening

盐碱化土壤在全球范围内广泛分布,我国作为受盐碱化影响较严重的国家之一,现有可利用盐碱地资源约0.27亿hm²,其中盐碱化耕地面积达0.07亿hm²,约占全国耕地总面积的20%,这一数据位居

世界第三位^[1]。盐碱地作为重要的边际土地资源,其高效改良与可持续利用对保障国家粮食安全、促进农业绿色发展和维护生态平衡具有战略意义。2024年中央一号文件特别指出,要实施差异化盐碱

收稿日期:2025-10-17;修回日期:2025-12-17

基金项目:抗盐碱紫花苜蓿种质资源收集及新品种选育(LCCX202408)资助

作者简介:耿小丽(1979-),女,汉族,甘肃陇西人,正高级畜牧师,博士,主要从事牧草遗传育种研究, E-mail:411147915@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: 417267718@163.com

耕地治理策略,协同推进“以种适地”与“以地适种”技术创新,并开展盐碱地综合利用示范工程。在此背景下,基于耐盐植物的生物改良技术因其兼具环境友好性和经济可行性,成为盐碱地治理的重要研究方向^[2-3]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为全球种植最广泛的豆科牧草,被誉为“牧草之王”,在88个国家和地区被广泛用作重要饲料来源。同时,在盐碱地改良方面,紫花苜蓿的表现也很突出,其具有较强的细胞离子调节能力和抗氧化系统,是豆科牧草中耐盐碱性较强的草种,它能够显著起到改良土壤,降低土壤盐碱度的作用。因此,选育抗盐碱能力更强的紫花苜蓿品种,对于扩展其种植区域和用途具有重要意义^[4-5]。

植物萌发阶段对盐胁迫最为敏感,也是决定建植成功的关键时期。研究表明,紫花苜蓿在种子萌发至幼苗定植阶段对NaCl胁迫的生理响应较营养生长期更为敏感,根系生物量受抑制程度显著高于地上部^[6-7]。Ashrafi等^[8-9]研究认为,225 mmol·L⁻¹和300 mmol·L⁻¹ NaCl是紫花苜蓿萌发期和苗期耐盐性筛选的适宜浓度;崔雪雯等^[10]发现,苜蓿半致死盐浓度均值为1.24%,可作为耐盐性鉴定的参考标准;于洁等^[11]则认为发芽率和幼苗干重是苜蓿耐盐筛选的理想指标。其他作物如小麦^[12](*Triticum aestivum* L.)、高粱(*Sorghum bicolor* L.)^[13]、裸燕麦(*Avena nuda* L.)^[14]等的耐盐性筛选也表明,发芽率、根长和鲜重是重要的鉴定指标。

目前,针对紫花苜蓿萌发期耐盐性的系统评价与种质筛选研究仍相对有限,尤其在多指标综合评价与杂交材料筛选方面亟待加强。因此,本研究以43份紫花苜蓿杂交F₂代为材料,通过设置不同NaCl浓度胁迫,测定多项萌发相关指标,结合主成分分析、隶属函数法及聚类分析等方法,旨在确定紫花苜蓿萌发期耐盐性筛选的适宜盐浓度;筛选有效的耐盐性评价指标,综合评价供试材料的耐盐性,筛选出耐盐性突出的种质,为紫花苜蓿耐盐育种及盐碱地生物改良提供材料与依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2024年3月在甘肃农业大学草业学院实验室进行。供试材料为43份紫花苜蓿杂交F₂代

种质(表1),由甘肃省草原技术推广总站提供。设置4个NaCl浓度处理:0%(CK),0.3%,0.6%,1.2%,每个处理3次重复。

表1 供试紫花苜蓿种质编号与名称

Table 1 Code and name of tested alfalfa germplasms

编号 No.	种质名称 Name	编号 No.	种质名称 Name
1	GD101	23	GZ61
2	GW141	24	GW101
3	GZ21	25	GD111
4	GD161	26	GD141
5	GW41	27	GD171
6	GD51	28	GD71
7	GW121	29	GD221
8	GW11	30	GZ41
9	GD121	31	GD91
10	GD291	32	GD181
11	GD241	33	GD31
12	GW71	34	GD271
13	GW131	35	GD211
14	GW81	36	GD201
15	GZ101	37	GD41
16	GZ81	38	GD231
17	GZ51	39	GW51
18	GZ91	40	GZ31
19	GD281	41	GD131
20	GD11	42	GD301
21	GD261	43	GD61
22	GD191		

1.2 试验方法

采用口径90 mm培养皿,铺双层滤纸,每皿均匀摆放50粒种子,加入5 mL相应浓度NaCl溶液,置于智能光照培养箱中,温度设定为(25±1)℃。每日定时补充相应浓度的NaCl溶液以保持滤纸湿润及胁迫环境稳定。分别于处理第4天(96 h)和第10天(240 h)统计发芽数,并于第10天测定胚根长、胚芽长和鲜重。试验期间,定期除去明显霉烂的种子,计算发芽率时,霉烂种子不计入总种子数。

1.3 测定指标与计算

$$\text{发芽势}(\text{GE})=(N_{72}/N_t)\times 100\%$$

式中N₇₂表示在处理第72 h时统计的发芽种子数。

$$\text{相对发芽势}(\text{RGE})=(\text{GE}_t/\text{GE}_o)\times 100\%$$

$$\text{发芽率}(\text{GR})=(N_{240}/N_t)\times 100\%$$

$$\text{相对发芽率}(\text{RGR})=(\text{GR}_t/\text{GR}_o)\times 100\%$$

胚根长(RL):第10天测量根尖至胚轴基部长度

胚芽长(SL):第10天测量芽尖至胚轴基部长度
相对生长量(RSL/RRL)=(处理组测定值/对照组
测定值)×100%

1.4 数据分析与综合评价方法^[15]

为系统评价紫花苜蓿萌发期耐盐性并筛选核心指标,本研究采用以下分析流程:首先,通过方差分析与变异系数比较,确定适宜的盐胁迫筛选浓度。其次,利用主成分分析(PCA)对多个耐盐指标进行降维,提取代表性主成分,以简化评价体系并筛选关键指标。随后,基于各指标的变异系数确定其客观权重,通过隶属函数法将多指标标准化并加权合成综合耐盐指数(D值)。最后,依据D值进行系统聚类分析,实现种质耐盐等级划分。

采用主成分分析提取特征值>1的主成分,以累计贡献率>85%确定主成分数量。通过隶属函数法对各指标进行标准化处理,公式为:

$$U(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}$$

式中 $U(X_{ij})$ 表示第*i*个品种第*j*项指标的标准
化隶属度, $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别代表该指标的最大观测
值和最小观测值。

采用变异系数法确定各指标权重 W_j , 公式为:

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}$$

表 2 不同 NaCl 浓度处理下紫花苜蓿萌发性状比较

Table 2 Comparison of germination traits of alfalfa under different NaCl concentrations

指标 Index	NaCl 浓度 Treat	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV
发芽率 Germination rate / %	CK	71.63 ^a	92.67	32	18.57	0.26
	0.3	63.49 ^b	92	24	20.34	0.32
	0.6	54.61 ^c	90	16.67	21.89	0.40
	1.2	10.06 ^d	42	0	12.39	1.23
发芽势 Germination potential / %	CK	89.44 ^a	98	48.67	10.20	0.11
	0.3	85.21 ^a	98	44.67	10.22	0.12
	0.6	79.16 ^b	98	32.67	14.51	0.18
	1.2	18.55 ^c	84.67	0	21.64	1.17
鲜重 Fresh weight / g	CK	2.03 ^a	2.82	0.83	0.41	0.20
	0.3	1.86 ^a	2.55	0.67	0.38	0.20
	0.6	1.51 ^b	2.36	0.43	0.43	0.29
	1.2	0.46 ^c	1.36	0	0.41	0.89
根长 Root length / cm	CK	6.70 ^a	9.35	2.68	1.27	0.19
	0.3	5.84 ^b	8.93	3.25	1.07	0.18
	0.6	5.08 ^c	8.08	2.80	1.22	0.24
	1.2	1.03 ^d	4.24	0	1.09	1.07
芽长 Bud length / cm	CK	1.11 ^a	6.53	0.64	0.87	0.78
	0.3	0.98 ^{ab}	1.42	0.63	0.21	0.21
	0.6	0.79 ^b	1.37	0.47	0.21	0.26
	1.2	0.24 ^c	0.71	0	0.23	0.97

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

式中, P_j 表示第*j*个评价指标的变异系数。

综合耐盐指数(D值)计算公式为:

$$D_i = \sum_{i=1}^n [U(X_{ij} \times W_j)]$$

其中 D_i 值域为 $[0, 1]$, 数值越大表明耐盐性越强。

1.5 生理指标的测定

为从生理机制上阐明不同耐盐性种质的差异,基于综合耐盐指数(D值)聚类结果,选取极端耐盐型(3份)、极端敏感型(3份)及中等耐盐型(3份)的代表性种质,测定其在0.6% NaCl胁迫下的脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量。

1.6 数据统计分析

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理与基础统计和作图,采用 SPSS 20.0 进行方差分析、主成分分析、相关分析和系统聚类分析。

2 结果与分析

2.1 适宜盐胁迫浓度的确定

不同 NaCl 浓度对紫花苜蓿萌发及生长的影响见表2。与对照(CK)相比,0.3% NaCl处理对部分材料的发芽势和鲜重无显著抑制,甚至对个别材料

有轻微促进作用,表明该浓度胁迫强度不足。1.2% NaCl处理下,各指标均值急剧下降,且变异系数(CV)显著增大(如发芽率 $CV=1.23$),表明该浓度胁迫过强,导致多数材料完全被抑制,不利于区分材料间的耐盐性差异。0.6% NaCl处理则表现出理想的筛选特性:各指标较CK均出现显著下降($P<0.05$),表明已达到有效胁迫水平;同时,各指标的变异系数(如发芽率 $CV=0.18$,根长 $CV=0.24$)较0.3%处理明显增加,表明该浓度下材料间的遗传差异得以充分体现。因此,0.6% NaCl被确

定为后续耐盐性综合评价与种质筛选的适宜胁迫浓度。

2.2 耐盐指数分析

对43份材料5个性状的耐盐指数进行分析(表3),发现各性状耐盐指数变异较大,其中发芽势、根长和芽长的变异系数最大,说明这些性状在不同材料间耐盐性差异显著。发芽率的耐盐指数均值最高(0.902),变异系数最小(0.2709),表明该性状相对稳定。

表3 43份紫花苜蓿种质5个性状耐盐指数统计

Table 3 Statistics of salt tolerance indices for five traits of 43 alfalfa germplasms

性状 Trait	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	变异系数 CV
发芽势 Germination potential/%	0.09	1.49	0.811	0.5529
发芽率 Germination rate/%	0.28	1.25	0.902	0.2709
鲜重 Fresh weight/g	0.28	1.41	0.7863	0.4572
根长 Root length/cm	0.33	1.47	0.7213	0.547
芽长 Bud length/cm	0.19	1.99	0.7988	0.4441

2.3 耐盐性状的主成分分析

用主成分分析法(PCA)系统解析了紫花苜蓿萌发期的耐盐特性。对5个耐盐指标进行主成分分析,提取特征值 >1 的3个主成分,累计贡献率达87.06%(表4)。PC1贡献率53.56%,主要反映种子萌发能力,发芽率载荷最高;PC2贡献率21.50%,主要反映根系与芽长等形态建成特征;PC3贡献率12.00%,主要反映地上部生长特性。

表4 紫花苜蓿耐盐性评价主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results for salt tolerance evaluation of alfalfa

因子 Factor	主成分 Principal component		
	I	II	III
发芽势 Germination potential/%	0.4996	-0.3274	-0.0672
发芽率 Germination rate/%	0.5377	-0.2249	-0.3444
鲜重 Fresh weight/g	0.4698	-0.2874	0.3029
根长 Root length/cm	0.3204	0.6853	-0.5586
芽长 Bud length/cm	0.3714	0.5385	0.6878
特征值 Eigenvalue	2.6778	1.0752	0.5999
贡献率 Contribution rate/%	53.5555	21.5039	11.9975
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	53.5555	75.0594	87.0569

2.4 耐盐性综合评价

基于隶属函数法计算综合耐盐指数(D值),结果见表5。D值范围为0.24~0.85,均值为0.56,变异系数为0.22,表明供试材料耐盐性差异显著。其中编号42(GD301),25(GD111),2(GW141),41

(GD131),27(GD171)等材料D值较高,耐盐性突出。

2.5 性状相关性及聚类分析

相关性分析表明(表6),综合耐盐指数D值与发芽率、根长、芽长均呈极显著正相关($P<0.01$),与发芽势、鲜重呈显著正相关($P<0.05$),其中发芽率与D值相关性最高($r=0.75$)。

聚类分析结果显示(图1),基于综合耐盐指数(D值),供试的43份苜蓿种质可划分为5个耐盐等级。其中,极端耐盐型种质7个(D值范围0.66~0.85),耐盐型11个(D值范围0.59~0.64),中等耐盐型13个(D值范围0.52~0.56),盐敏感型10个(D值范围0.40~0.49),极端盐敏感型2个(D值范围0.24~0.25)。通过评价鉴定,获得7个耐盐性突出的种质材料,分别为GW141, GD131, GZ21, GW71, GD111, GD171和GD301。

2.6 萌发期生理指标检测

为进一步从生理机制层面解析不同耐盐型种质的响应差异,测定了代表性种质在0.6% NaCl胁迫下的脯氨酸(Pro)与丙二醛(MDA)含量,并以相对值(R-Pro、R-MDA)表示(图2)。如图3所示,随着种质综合耐盐指数(D值)的降低(自左至右),其生理响应呈现规律性变化:相对脯氨酸含量(R-Pro)逐步下降,而相对丙二醛含量(R-MDA)则逐

表 5 紫花苜蓿种质萌发期耐盐性综合评价
Table 5 Comprehensive assessment of germination-stage salt tolerance of alfalfa germplasms

种质编号 Variety number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D value	D 排序 D rank
	μ_1	μ_2	μ_3		
1	0.66	0.43	0.50	0.56	19
2	0.81	0.82	0.28	0.73	3
3	0.73	0.70	0.36	0.66	7
4	0.59	0.79	0.35	0.62	12
5	0.25	0.57	0.80	0.43	39
6	0.74	0.40	0.55	0.61	16
7	0.56	0.17	0.25	0.40	40
8	0.45	0.00	0.00	0.24	43
9	0.25	0.77	0.68	0.47	38
10	0.68	0.61	0.55	0.64	9
11	0.57	0.62	0.23	0.53	28
12	0.72	0.48	0.84	0.67	6
13	0.56	0.50	0.69	0.56	21
14	0.39	1.00	0.20	0.54	25
15	0.60	0.37	0.65	0.54	27
16	0.45	0.67	0.19	0.48	35
17	0.56	0.48	0.50	0.53	30
18	0.47	0.41	0.67	0.48	34
19	0.43	0.55	1.00	0.55	22
20	0.32	0.80	0.41	0.48	36
21	0.69	0.51	0.55	0.61	13
22	0.56	0.57	0.54	0.56	20
23	0.67	0.46	0.70	0.61	15
24	0.77	0.46	0.45	0.63	10
25	1.00	0.68	0.44	0.82	2
26	0.65	0.67	0.56	0.64	8
27	0.75	0.53	0.79	0.69	5
28	0.55	0.72	0.52	0.60	17
29	0.54	0.54	0.59	0.55	24
30	0.00	0.55	0.54	0.25	42
31	0.42	0.55	0.60	0.49	33
32	0.60	0.53	0.25	0.53	29
33	0.23	0.48	0.56	0.35	41
34	0.32	0.77	0.58	0.49	32
35	0.70	0.57	0.34	0.61	14
36	0.62	0.43	0.49	0.55	23
37	0.61	0.25	0.75	0.52	31
38	0.45	0.48	0.56	0.47	37
39	0.66	0.60	0.51	0.62	11
40	0.58	0.64	0.53	0.59	18
41	0.75	0.68	0.71	0.73	4
42	0.88	0.81	0.79	0.85	1
43	0.54	0.51	0.61	0.54	26

注: μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别代表 3 个主成分对应的隶属函数值
Note: μ_1 , μ_2 , and μ_3 represent the membership function values of the three principal components

表 6 各性状耐盐指数与综合耐盐指数 D 值的相关性
Table 6 Correlation between salt tolerance indices of each trait and comprehensive salt tolerance index D value

相关系数 Correlation coefficient	发芽势 Germination potential/%	发芽率 Germination rate/%	鲜重 Fresh weight/g	根长 Root length/cm	芽长 Bud length/cm	D 值 D value
发芽势 Germination potential/%	1.00					
发芽率 Germination rate/%	0.75**	1.00				
鲜重 Fresh weight/g	0.54**	0.63**	1.00			
根长 Root length/cm	0.18	0.37*	0.17	1.00		
芽长 Bud length/cm	0.33*	0.30	0.33*	0.45**	1.00	
D 值 D value	0.55**	0.63**	0.40**	0.63**	0.75**	1.00

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下的显著相关性
Note: *and** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively

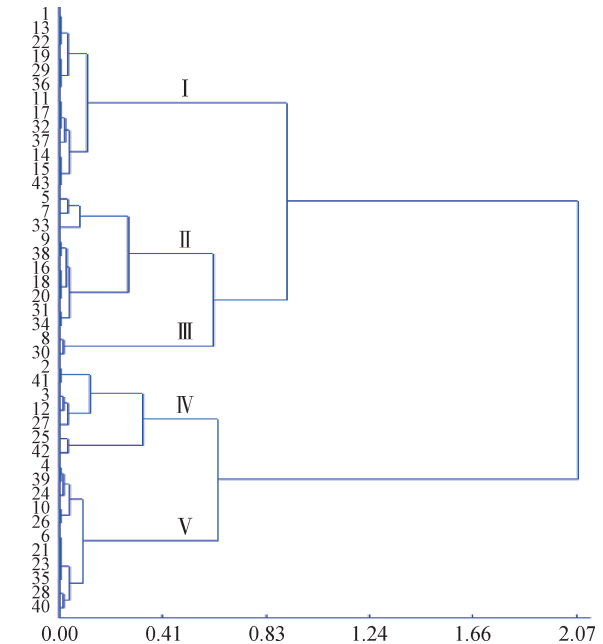


图 1 43 份紫花苜蓿种质耐盐性聚类图
Fig. 1 Cluster dendrogram of salt tolerance of 43 alfalfa germplasms

注: I, 中等耐盐群体; II, 盐敏感群体; III, 极端敏感群体; IV, 极端耐盐群体; V, 耐盐群体
Note: I, Moderately salt-tolerant group; II, Salt-sensitive group; III, Extremely sensitive group; IV, Extremely salt-tolerant group; V, Salt-tolerant group

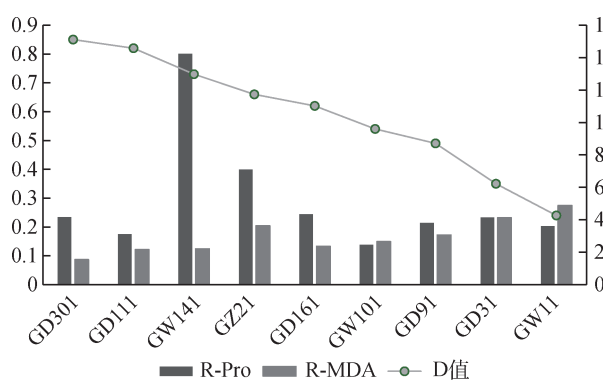


图 2 不同耐盐型紫花苜蓿种质生理指标变化趋势
Fig. 2 Variation trends of physiological indicators of different salt-tolerant alfalfa germplasms

注: 柱形表示相对脯氨酸含量(R-Pro, 左侧 Y 轴), 折线表示相对丙二醛含量(R-MDA, 右侧 Y 轴)。种质按综合耐盐指数(D 值)从高到低排列
Note: Bars indicate relative proline content (R-Pro, left Y-axis), and the line indicates relative malondialdehyde content (R-MDA, right Y-axis). Germplasms are arranged in descending order of comprehensive salt tolerance index (D value)

渐上升。极端耐盐型种质(如 GD301, GD111)表现出较强的脯氨酸积累能力(R-Pro>2.5)与较轻的膜脂过氧化程度(R-MDA<1.0);而极端敏感型种

质(如GW11, GD31)的脯氨酸积累能力弱($R-Pro \approx 1.1 \sim 1.2$), 膜脂过氧化损伤严重($R-MDA > 2.0$)。该结果表明, 耐盐性较强的紫花苜蓿种质在萌发期能够通过积极积累渗透调节物质脯氨酸来缓解盐胁迫引起的渗透失衡, 从而减轻活性氧对细胞膜的伤害, 这可能是其保持较高萌发率与生长势的重要生理基础。

3 讨论

紫花苜蓿耐盐种质资源的系统评价是耐盐育种的重要前提^[16]。萌发期作为植物对盐胁迫最敏感的阶段之一, 其耐盐性评价具有操作简便、通量高、周期短的显著优势^[17-18]。大量研究表明, 紫花苜蓿等作物的萌发期耐盐性与后续苗期乃至全生育期的耐盐表现存在显著正相关^[19-21], 这为利用萌发期筛选进行早期预测提供了可靠依据^[22-24]。本研究通过比较不同NaCl浓度对萌发指标的抑制效应与材料间变异程度, 确定0.6% NaCl ($102 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 为紫花苜蓿萌发期耐盐性筛选的适宜胁迫浓度。该浓度下, 各材料在发芽势、芽长及根长等关键指标上均表现出显著差异($P < 0.05$), 且未出现普遍性萌发抑制, 有效区分了不同材料的耐盐潜力。这一筛选浓度的确定, 与崔雪雯等^[10]在苜蓿萌发期耐盐性研究中采用的阈值相近, 进一步支持了其在实践应用中的合理性。

植物的耐盐性是由多基因控制、多生理过程协同作用的复杂性状, 因此建立科学的多指标综合评价体系至关重要^[15]。隶属函数分析法能够客观量化各指标在群体中的变异程度及其对整体耐盐性的贡献权重, 已在多种作物耐盐性评价中被成功应用^[25-28]。本研究结合主成分分析(PCA)与隶属函数法, 构建了紫花苜蓿萌发期耐盐性综合评价模型(D值)。PCA结果显示, 发芽率、根长和芽长是贡献率最高的核心指标, 它们分别代表了种子在盐胁迫下的生存能力(发芽率)与早期幼苗的形态建成潜力(根长、芽长)。这一结果与小麦^[15]、谷子^[29-31]等作物耐盐性评价中确立的关键指标高度一致, 表明这些性状在植物早期耐盐适应中具有普遍重要性。本研究进一步将鲜重纳入评价体系, 发现其与D值呈显著正相关($P < 0.01$), 验证了生物量积累作为耐盐性辅助评价指标的可行性^[32], 这与盐胁迫导致生理干旱从而抑制生长的本质相契合。

基于综合耐盐指数(D值)的聚类分析, 将43份供试材料划分为5个耐盐等级, 其中筛选出GW141, GD131, GZ21, GW71, GD111, GD171和GD301等7份高度耐盐型种质。这些材料在0.6% NaCl胁迫下表现出“高发芽率-强根系发育”的协同耐性特征(相对发芽势 $> 82\%$, 根长 $> 5.61 \text{ cm}$), 表明其在盐胁迫下兼具较高的萌发保障与良好的形态维持能力。这种协同耐性可能与种子内部活跃的激素调控、高效的离子区隔化机制以及萌发初期抗氧化系统的快速激活等生理过程密切相关^[8, 10]。

植物的耐盐性不仅体现在外部形态的维持, 更取决于其内在的生理适应机制^[8, 16]。本研究通过分析脯氨酸(Pro)与丙二醛(MDA)等关键生理指标, 从渗透调节与膜稳定性角度揭示了不同耐盐型种质的生理分化。结果表明, 极端耐盐型种质(如GD301、GD111)在0.6% NaCl胁迫下, 表现出显著的脯氨酸积累能力($R-Pro > 2.5$)与轻微的膜脂过氧化水平($R-MDA < 1.0$)。脯氨酸作为重要的相容性渗透调节物质, 其积累能有效降低细胞水势, 维持萌发过程中的水分吸收与胚胎细胞膨压^[6, 10]; 同时, 作为活性氧清除剂, 脯氨酸也能间接减轻氧化胁迫^[8]。与之相对应, 较低的MDA含量表明这些种质的细胞膜系统在盐胁迫下保持了较好的完整性。反之, 极端敏感型种质(如GW11、GD31)的脯氨酸积累响应微弱($R-Pro \approx 1.1$), 而MDA含量大幅上升($R-MDA > 2.0$), 说明其因渗透调节能力不足而导致严重的氧化损伤与膜结构破坏, 这直接抑制了胚根与胚芽的伸长^[7]。相关性分析进一步证实, 相对脯氨酸含量($R-Pro$)与综合耐盐指数(D值)呈极显著正相关, 而相对丙二醛含量($R-MDA$)与D值呈极显著负相关。这表明, 萌发期高效的脯氨酸积累及由此带来的膜保护效应, 是紫花苜蓿实现盐胁迫下高发芽率与良好形态建成的关键生理基础之一。本研究筛选出的GW141, GD301等材料, 正体现了这种“强渗透调节-弱氧化损伤-优农艺表现”的协同耐盐特征, 与Ashrafi等^[8]在苗期研究中强调的生理耐受机制相一致。

4 结论

(1) 本研究确立0.6% NaCl为紫花苜蓿萌发期耐盐性高效筛选的适宜胁迫浓度。

(2) 构建了涵盖发芽率、根长、芽长等农艺指标

及脯氨酸相对含量(R-Pro)的耐盐性综合评价体系,明确了其核心指标地位。

(3)从43份种质中鉴定出GW141, GD131, GZ21, GW71, GD111, GD171和GD301共7份极端耐盐种质,这些材料在盐胁迫下表现出协同增强的农艺性状与生理适应性,具备直接应用于耐盐育种及盐碱地改良的潜力。

参考文献

- [1] 吕国华, 王庆锁, 宋佳坤, 等. 我国盐碱地综合利用的生态保护战略[J]. 中国农业科学, 2025, 58(20): 4047-4053
LÜ G H, WANG Q S, SONG J S, et al. Ecological protection strategy for comprehensive utilization of saline-alkali land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(20): 4047-4053
- [2] 杨全刚, 孙雅杰, 王会, 等. 盐碱地改良与综合利用技术研究进展与展望[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(3): 384-395
YANG Q G, SUN Y J, WANG H, et al. Research progress and prospects of saline-alkali land improvement and comprehensive utilization technology[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 56(3): 384-395
- [3] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20: 89-94
WANG F Y, WANG C, LIU Q Q, et al. Improvement effects of humic acid, earthworm cast and earthworm protein fertilizer on coastal saline-alkali soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20: 89-94
- [4] 朱琨, 刘骅峻, 冯成龙, 等. 盐胁迫对不同苜蓿品种种子萌发的耐盐性综合评价[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3724-3733
ZHU K, LIU H J, FENG C L, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of different alfalfa varieties during seed germination under salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3724-3733
- [5] 余如刚, 王雪茹, 王国良, 等. 紫花苜蓿品种苗期耐盐性分析及评价指标筛选[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1781-1789
YU R G, WANG X J, WANG G L, et al. Analysis of salt tolerance and screening of evaluation indicators for alfalfa varieties at seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1781-1789
- [6] AI-KHATIB M. Between and within culture variability in salt tolerance in lucerne[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 1994, 41: 159-166
- [7] 王娅琳, 魏琳, 李娜, 等. 3种牧草种子萌发期耐盐性综合评价[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 3104-3113
WANG Y L, WEI L, LI N, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of three forage grass species during seed germination[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3104-3113
- [8] ASHRAFI E, RAZMJOO J, ZAHEDI M, et al. Selecting alfalfa cultivars for salt tolerance based on some physiochemical traits[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(106): 1758-1764
- [9] BADRAN A E, ELSHEREBENY E A M, SALAMA Y A. Performance of some Alfalfa cultivars under salinity stress conditions[J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 7(10): 281-290
- [10] 崔雪雯, 郭志鹏, 毛月, 等. 33个紫花苜蓿品种萌发期的耐盐性评价[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(2): 55-65
CUI X W, GUO Z P, MAO Y, et al. Evaluation of salt tolerance of 33 alfalfa varieties at germination stage[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2022, 43(2): 55-65
- [11] 于杰, 颜立军, 季晓亭, 等. 苜蓿和香薷种子萌发期耐盐性筛选与综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(3): 449-460
YU J, YAN L J, JI X T, et al. Screening and comprehensive evaluation of salt tolerance of alfalfa and mosla seeds during germination[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(3): 449-460
- [12] 王军, 李军, 王龙, 等. 不同遗传类型的小麦品种(系)耐盐性筛选[J]. 江苏农业科学, 2009(3): 77-79
WANG J, LI J, WANG L, et al. Screening of salt tolerance in wheat varieties (lines) with different genetic types[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009(3): 77-79
- [13] 孙璐, 周玉飞, 王长水, 等. 苏丹草品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714-1722
SUN L, ZHOU Y F, WANG C S, et al. Screening and identification of salt tolerance in sudan grass varieties at germination stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 45(9): 1714-1722
- [14] 陈欣, 张宗文, 吴斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2038-2046
CHEN X, ZHANG Z W, WU B. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening of salt-tolerant germplasm in naked oat during germination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(10): 2038-2046
- [15] 高坤奥, 田仁美, 贾惠宁, 等. 236份小麦种质苗期耐盐性鉴定及耐盐指标筛选[J]. 麦类作物学报, 2024, 10(9): 1115-1124
GAO S A, TIAN R M, JIA H N, et al. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerance indicators in 236 wheat germplasms at seedling stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 10(9): 1115-1124
- [16] 张建全, 王彦荣. 胡卢巴生物生态学特征及种质资源研究进展[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 94-101
ZHANG J Q, WANG Y R. Research progress on biological characteristics and germplasm resources of fenugreek[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(6): 94-101
- [17] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价[J]. 作物学报, 2005, 31(1): 58-64
MA Y Q, WENG Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(1): 58-64
- [18] 阎志红, 刘文革, 赵胜杰, 等. NaCl胁迫对不同西瓜种质资

- 源发芽的影响[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 220-225
- YAN Z H, LIU W G, ZHAO S J, et al. Effects of NaCl stress on germination of different watermelon germplasm resources [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2006, 7 (2): 220-225
- [19] 刘芳, 付宇, 高世荣, 等. 盐胁迫下玉米苗期的响应及耐盐性评价[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(6): 22-26
- LIU F, FU Y, GAO S R, et al. Response under salt stress of maize in seedling stage and appraisal of salt tolerance of maize[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2007, 19(6): 22-26
- [20] 彭智, 李龙, 柳玉平, 等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645
- PENG Z, LI L, LIU Y P, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance in wheat at germination and seedling stages [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 638-645
- [21] 龙卫华, 浦惠明, 张洁夫, 等. 甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(3): 271-275
- LONG W H, PU H M, ZHANG J F, et al. Screening of salt tolerance in brassica napus at germination stage [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(3): 271-275
- [22] 张寒, 潘香逾, 王秀华, 等. 苜蓿萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 666-672
- ZHANG H, PAN X Y, WANG X H, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening of salt-Tolerant germplasm in alfalfa during germination [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 666-672
- [23] MAITI R K, MAITI L E, MAITI S, et al. Genotypic variability in maize cultivars (*Zea mays* L.) for resistance to drought and salinity at the seedling stage [J]. J Plant Physiol, 1996, 148(6): 741-744
- [24] 刘旭, 史娟, 张学勇, 等. 小麦耐盐种质的筛选鉴定和耐盐基因的标记[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 948-954
- LIU X, SHI J, ZHANG X Y, et al. Screening and identification of salt-tolerant wheat germplasm and marking of salt-tolerant genes [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 43 (9) : 948-954
- [25] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价[J]. 作物学报, 2005, 31(1): 58-64
- MA Y Q, WENG Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(1): 58-64
- [26] 牛远, 杨修艳, 戴存凤, 等. 大豆芽期和苗期耐盐性评价指标筛选[J]. 大豆科学, 2018, 37(2): 215-223
- NIU Y, YANG X Y, DAI C F, et al. Screening of evaluation indicators for salt tolerance in soybean at germination and seedling stages [J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 215-223
- [27] 侯文焕, 赵艳红, 唐兴富, 等. 菜用黄麻种质萌发期耐盐性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(2): 309-320
- HOU W H, ZHAO Y H, TANG X F, et al. Evaluation of salt tolerance in vegetable jute germplasm at germination stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(2): 309-320
- [28] 段文学, 张海燕, 解备涛, 等. 甘薯苗期耐盐性鉴定及其指标筛选[J]. 作物学报, 2018, 44(8): 1237-1247
- DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, et al. Identification of salt tolerance and screening of indicators in sweet potato at seedling stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(8): 1237-1247
- [29] 田伯红, 王素英, 李雅静, 等. 谷子地方品种发芽期和苗期对 NaCl 胁迫的反应和耐盐品种筛选[J]. 作物学报, 2008, 34 (12): 2218-2222
- TIAN B H, WANG S Y, LI Y J, et al. Response of foxtail millet landraces to nacl stress at germination and seedling stages and screening of salt-tolerant varieties [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(12): 2218-2222
- [30] 秦岭, 张艳亭, 陈二影, 等. 谷子萌发期耐盐种质筛选及其保护酶系统对盐胁迫的响应[J]. 中国农业科学, 2009, 22(8): 4027-4038
- QIN L, ZHANG Y T, CHEN E Y, et al. Screening of salt-tolerant germplasm and response of protective enzyme system to salt stress in foxtail millet during germination [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 22(8): 4027-4038
- [31] 韩飞, 诸葛玉平, 娄燕宏, 等. 63 份谷子种质的耐盐综合评价及耐盐品种筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(4): 685-693
- HAN F, ZHUGE Y P, LOU Y H, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening of salt-tolerant varieties in 63 foxtail millet germplasms [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(4): 685-693
- [32] 张智猛, 慈敦伟, 丁红, 等. 花生品种耐盐性指标筛选与综合评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3487-3494
- ZHANG Z M, CI D W, DING H, et al. Screening of salt tolerance indicators and comprehensive evaluation of peanut varieties [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3487-3494

(责任编辑 刘婷婷)